استنتاج معادلات جدید برای تخمین بیشینه شتاب و سرعت زمین ناشی از زلزله★

علی درخشانی[۱] علی صابری[۲]

چکیده *در این پژوهش یک روش نوین موســوم به M5، برای به‌دســت‌آوردن معادلات پیش‌بینی حرکات نیرومند زمین مورداســتفاده قرار گرفت. بیشینه شتاب زمین و بیشینه سرعت زمین بااستفاده از بزرگی زمین‌لرزه، فاصلهٔ منبع تا سایت، متوسط سرعت موج برشی و مکانیسم گسلش و نیز بهره‌گیری از پایگاه داده‌های گستردهٔ پژوهشگاه مهندسی زمین‌لرزه (PEER) فرمول‌بندی شدند. برای اعتبارسنجی، مدل حاصل با مدل‌های شناخته شده مقایسه گردید. تحلیل حساسیت و آنالیز پارامتریک برای تعیین اهمیت پارامترهای مؤثر بر مدل و حساسیت آن به تغییرات پارامترها انجام شد. معادلات پیشنهادی بسیار آسان است و می‌توان آنها را با اطمینان برای اهداف پیش‌طراحی استفاده نمود.*

واژه‌های کلیدی حرکات نیرومند زمین، معادلات پیش‌بینی، مدل درختی M5، ارزیابی خطر لرزه‌ای.

Derivation of New Equations for Estimation of Earthquake Induced Peak Ground Acceleration and Velocity

A. Derakhshani A. Saberi

Abstract *In this study, a new method called M5, was employed to derive ground-motion prediction equations (GMPEs). Peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV) was formulated by seismic parameters including earthquake magnitude, earthquake source to site distance, average shear-wave velocity and faulting mechanisms with The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) database. For verification, the proposed model was compared with three well-known models by Correlation Coefficient, Root Mean Square Error and Mean Absolute Error. A sensitivity analysis and a parametric analysis was carried out to determine the contributions of the parameters affecting model and sensitivity of the models to the variations of the influencing parameters. The equations are remarkably simple and can reliably be used for pre-design purposes.*

Key Words Strong Ground Motion Parameters, Prediction Equations, M5 Model Tree, Earthquake Risk Assessment.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۱/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۷/۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران.

Email: adera@shahed.ac.ir

(۲) دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران مرکزی.

مقدمه

زمین‌لرزه به‌عنوان یک رویداد غیر قابل پیش‌بینی، همواره بشر را در معرض خطرات و صدمات جانی و مالی قرار داده‌است. ازاین‌رو خطرات و عواقب ناشی از زمین‌لرزه ناگزیر اما کاهش اثرات منفی آن امکان‌پذیر است، که این مهم، نیازمند برآورد خطر زمین‌لرزه به‌ویژه در نواحی لرزه‌خیز است. ازجمله مهم‌ترین بخش‌های مطالعات ارزیابی خطر زمین‌لرزه برای یک ساخت‌گاه، پیش‌بینی پارامترهای جنبش نیرومند زمین است که به‌وسیلهٔ روابط موسوم به روابط کاهندگی یا روابط پیش‌بینی حرکات نیرومند زمین (Ground Motion Prediction Equations) صورت می‌گیرد که گزینش مناسب‌ترین و کاراترین روابط کاهندگی، یکی از مهم‌ترین اهداف محققان در تحلیل خطر لرزه‌ای یک منطقه به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزای تحلیل خطر لرزه‌ای و یکی از مراحل بنیادی در طراحی سازه‌های مقاوم دربرابر زمین‌لرزه است. پارامترهای مهندسی یک زمین‌لرزه را می‌توان به دو ردهٔ اصلی پارامترهای مربوط به حوزهٔ زمان مانند بیشینه شتاب زمین(Peak Ground Acceleration) و بیشینه سرعت زمین (Peak Ground Velocity) و نیز پارامترهای مربوط به حوزهٔ پاسخ مانند شتاب شبه طیفی (Pseudo Spectral Acceleration) تقسیم نمود که می‌توان برای ارزیابی ریسک سازه‌ها از آنها بهره برد. با وجود این‌که پارامترهای طیفی کارامدتر از پارامترهای حوزهٔ زمان هستند [1]، به‌دلیل مستقل بودن پارامترهای حوزهٔ زمان به‌کارگیری آنها آسان‌تر است؛ بنابراین در پژوهش‌های خطر لرزه‌ای PGA و PGV بیشتر مورداستفاده قرارگرفته‌اند. به‌منظور برآورد این عناصر می‌توان از روش‌های مختلفی مانند بررسی درجا و یا مدل‌سازی فیزیکی استفاده نمود که معمولاً بسیار گسترده، توان‌فرسا و پرهزینه است[2]، لذا معادلات پیش‌بینی حرکات زمین (GMPEs) نقش برجسته‌ای در آنالیز خطر لرزه‌ای بازی می‌کنند. PGA وPGV پارامترهای حوزهٔ زمان حرکات زمین هستند که به‌طور متداول مورداستفاده قرارگرفته‌اند. شاخص‌ترین جنبه‌های لرزه‌شناسی که پارامترهای حرکات زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهند شامل اثر منبع، اثر مسیر و اثر سایت است. اثر منبع به پارامترهای گوناگونی هم‌چون سطح افت تنش در رویداد زمین‌لرزه، مکانیسم گسلش و جهت گسلش مربوط است که اثر این پارامترها یکسان نیست و به فاصلهٔ سایت موردنظر از گسل بستگی دارد و برای آن در ادبیات فنی موضوع تعاریف مختلفی (مانند نزدیک‌ترین فاصله از محل گسیختگی، فاصلهٔ جوینر–بور و...) ارائه شده‌است. [3] اثر سایت در برخی از مدل‌ها به‌صورت کلی درنظر گرفته می‌شود (به‌عنوان مثال، خاک یا سنگ) و در برخی دیگر از سرعت موج برشی در خاک به‌عنوان شاخص اثر سایت استفاده می‌کنند. به‌طور کلی، GMPEs نوین عموماً ازنظر بزرگی زمین‌لرزه، فاصلهٔ منبع تا سایت، شرایط ژئوتکنیکی سایت و مکانیسم گسلش بررسی می‌شوند [3-5]، اما پارامترهای فیزیکی مؤثر دیگر مانند افت تنش، انتشار گسیختگی، راستاپذیری و رفتار غیرخطی خاک به‌دلیل پیچیدگی بسیار زیاد در توسعهٔ معادلات پیش‌بینی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند [6,7].

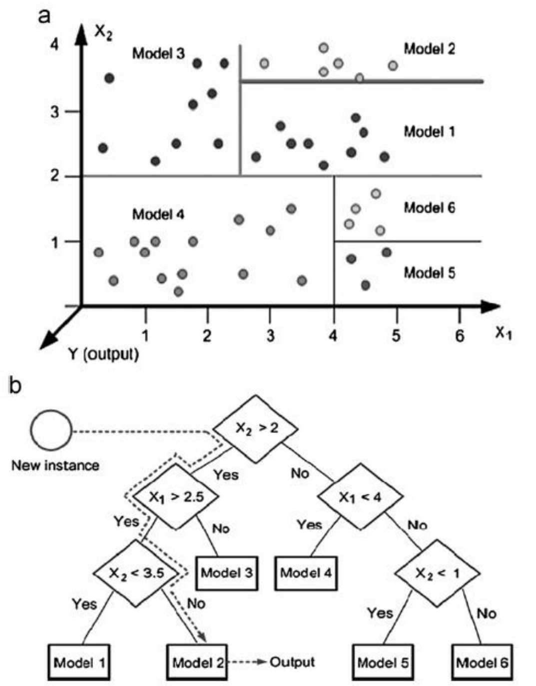
هدف ا صلی این پژوهش پیش‌بینی بی شینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) با بهره‌گیری از الگوریتم درختی مبتنی بر رگرسیون موسوم به M5 است که پس از تهیهٔ مدل‌های نهایی برای هر یک از انواع گسل، به‌منظور اعتبار سنجی، مدل‌های ارائه شده با ۳ مدل بیشتر شناخته‌شده در این زمینه (Boore and Atkinson [8]،Campbell and Bozorgnia [9] و Gandomi, et al. [10]) که دارای اشتراک در پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی بودند مقایسه گردید و برای تحلیل عملکرد و اعتبار، آنالیز پارامتریک و حساسیت برروی مدل انجام شد.

الگوریتم M5

با پیشرفت در روش‌های داده‌کاوی به‌کمک رایانه، معادلات جدید برای پیش‌بینی حرکت زمین برپایهٔ الگوریتم‌های ژنتیکی و ترکیبی ژنتیکی [10]، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) [10,11] و دیگر الگوریتم‌های هوش مصنوعی [12,13] ارائه شده‌است. در این زمینه شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌بینی معادلات حرکت زمین استفاده شده‌است اما این روش مانند بسیاری از دیگر انواع روش‌های الگوریتم‌های هوش مصنوعی (Artificial Intelligence) شفاف و قابل‌فهم نیست. ازاین‌رو به‌عنوان یکی از اهداف اصلی این پژوهش، به‌منظور یافتن روابط ساده‌تر از روش رگرسیون درختی M5 استفاده شده‌است. این روش یکی از موفق‌ترین و رایج‌ترین روش‌های مدل‌سازی‌های داده‌محور است که برای نخستین بار توسط Quinlan [14] به‌صورت مدل درخت تصمیم موسوم به M5 برای پیش‌بینی داده‌های پیوسته ارائه شد و Witten and Wang [15] این مدل را توسعه دادند. برخلاف مدل‌های درخت تصمیم معمول که کلاس یا رده‌های گسسته را به‌عنوان خروجی ارائه می‌کنند، مدل M5 مدل خطی چندمتغیره را برای داده‌ها در هر گره از مدل درختی می‌سازد. برپایی ساختار مدل‌های درخت تصمیم‌گیری دارای ۳ مرحلهٔ اصلی است؛ ایجاد درخت، هرس کردن آن و ساده‌سازی درخت. در گام ساختن درخت، از یک الگوریتم استنتاجی یا معیار تقسیم (انشعاب) برای ساخت یک درخت تصمیم استفاده می‌شود. معیار بخش کردن برای الگوریتم مدل M5 ارزیابی انحراف معیار مقادیر کلاسی است که به‌عنوان کمیتی از خطا به یک گره می‌رسد و کاهش مورد انتظار در این خطا را به‌عنوان نتیجهٔ آزمون هر پارامتر یا صفت در آن گره محاسبه می‌کند [16]. در شکل (۱) نمونهٔ جداسازی درخت نشان داده شده‌است.

کاهش انحراف معیار (SDR) از رابطهٔ (۱) به‌دست می‌آید:

$$SDR = sd(T) - \sum \frac{|T_i|}{|T|} sd(T_i) \qquad (۱)$$



شکل ۱ جداسازی فضای ورودی و پیش‌بینی توسط مدل درختی برای داده‌های جدید. a) جداسازی فضای ورودی x1 × x2 به‌وسیلهٔ الگوریتم درختی M5 و b) پیش‌بینی مقدار جدید توسط مدل درختی [17]

که در آن T بیانگر یک سری نمونه‌هایی است که به گره می‌رسند و T_i بیانگر نمونه‌هایی است که iامین خروجی سری پتانسیلی را دارند و sd بیانگر انحراف معیار است. به‌دلیل فرایند انشعاب، داده‌های قرارگرفته در گره‌های فرزند، انحراف معیار کمتری نسبت به گره مادر دارند و بنابراین خالص‌تر هستند. پس از بیشینه‌سازی همهٔ انشعاب‌های ممکن، M5 صفتی را گزینش می‌کند که کاهش مورد انتظار را بیشینه کند. این تقسیم بیشتر ساختار شبه‌درختی بزرگی را تشکیل می‌دهد که سبب بیش‌برازش (Over-Fitting) می‌شود. برای غلبه بر مسئلهٔ بیش‌برازش، درخت تشکیل‌شده باید هرس شود. این کار با جایگزینی یک درخت فرعی با یک برگ انجام می‌شود. بنابراین، گام دوم در طراحی مدل درختی شامل هرس کردن

درخت رشدیافته و جایگزینی درختان فرعی با توابع رگرسیونی خطی است. این روش ساخت مدل درختی، فضای پارامترهای ورودی را به نواحی یا زیر فضاهای کوچک‌تر تقسیم می‌کند و در هرکدام از آنها، یک مدل رگرسیونی خطی برازش می‌دهد. بعداز این‌که مدل خطی به‌دست آمد، برای کمینه کردن خطای تخمین با حذف کردن پارامترها، ساده‌سازی مدل انجام می‌شود. در مدل M5 از یک جستجوی حریصانه برای حذف متغیرهایی که مشارکت کمی در مدل دارند، استفاده می‌شود [14].

پارامترهای ورودی

در این پژوهش بر پایهٔ مرور ادبیات فنی، ٤ پارامتر در مدل‌سازی معادلات پیش‌بینی PGA و PGV به کار رفته‌است. فرمول‌بندی درنظر گرفته‌شده بدین‌صورت است:

$$\frac{PGA}{PGV} = f\left(M_w , R_{jb} , V_{s30} , F \right) \qquad (۲)$$

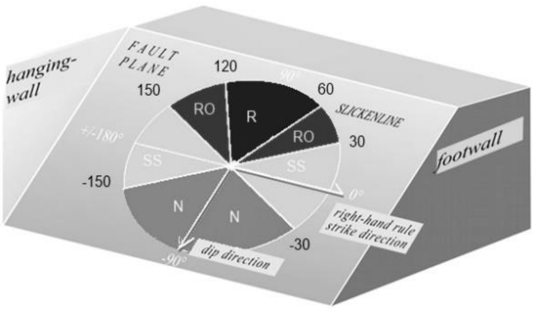
که در آن M_W بزرگی زمین‌لرزه، R_{jb} نزدیک‌ترین فاصله افقی تا تصویر عمودی صفحهٔ گسیختگی گسل (فاصلهٔ جوینر- بور)، V_{s30} متوسط سرعت موج‌برشی در ۳۰ متر بالایی سایت و F مکانیسم گسلش شامل گسل‌های نرمال، امتدادلغز، معکوس و معکوس مایل است که باتوجه به زاویهٔ ریک و مطابق جدول (۱) و شکل (۲) تفکیک می‌شود.

پایگاه داده‌ها

منبع داده های حرکات نیرومند زمین به کاررفته برای توسعهٔ GMPEs پایگاه داده‌هایی بوده‌است که در پروژهٔ PEER-NGA (Pacific Earthquake Engineering Research Center- Next Generation Attenuation Relationship) به‌وسیلهٔ Power, et al. [18] جمع‌آوری شده بود.

جدول ۱ تقسیم‌بندی مکانیسم‌های گسلش برپایهٔ زاویهٔ ریک

Mechanism Class	Rake Angle
Strike - Slip	-180 < Rake < -150
	-30 < Rake < 30
	150 < Rake < 180
Normal	-150 < Rake < -30
Reverse	60 < Rake < 120
Reverse - Oblique	30 < Rake < 60
	120 < Rake < 150



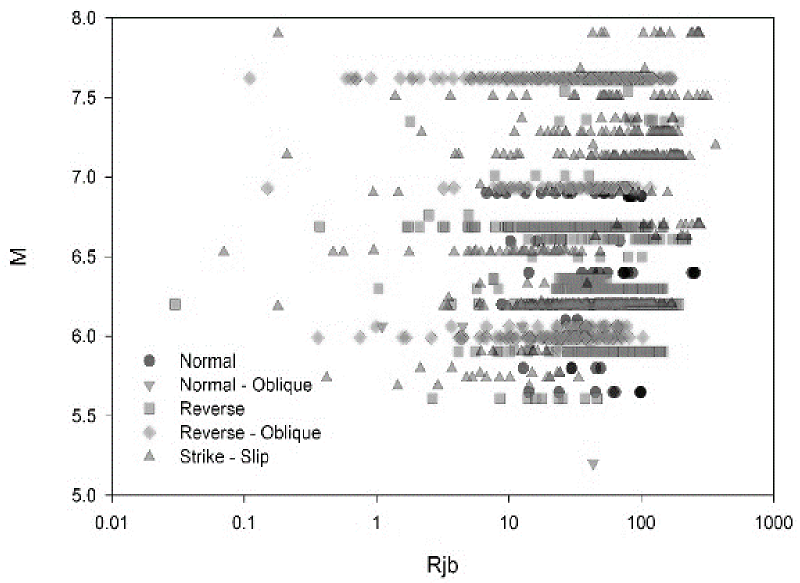
شکل ۲ تقسیم‌بندی مکانیسم‌های گسلش برپایهٔ زاویهٔ ریک

پایگاه داده (NGA Flatfile V 7.3) دربرگیرندهٔ داده‌های ثبت‌شدهٔ زمین‌لرزه‌های پوسته‌ای کم‌عمق در مناطق تکتونیکی فعال جهان است. پایگاه داده‌ها طیف گسترده‌ای از بزرگی و فاصله را پوشش می‌دهد. پژوهشگران بسته به نوع مطالعه ممکن است که از همهٔ پایگاه داده‌ها استفاده کنند و یا آنالیزهایشان را به زیرمجموعه‌های گزینشی محدود کنند. در این پژوهش، بخشی از پایگاه داده از آنالیز حذف شده‌است. مجموعهٔ داده‌های فاقد اطلاعات پارامترهای موردنیاز و هم‌چنین نگاشت‌های تکراری موارد حذف‌شده از آنالیز هستند. درنهایت، از مجموع ۳۵۵۱ نگاشت، ۲۷۷۷ نگاشت برای انواع گسل‌های ذکرشده شامل گسل امتدادلغز، نرمال، معکوس و معکوس مایل برای ایجاد مدل استفاده شد. متغیرهای پیش‌بینی‌کنندهٔ موجود در آنالیز M_w، R_{jb}، V_{s30} و F بودند و PGA و PGV پارامترهای حرکات زمین

بودند که فرموله شدند. شکل (۳) توزیع داده‌های مورداستفاده برای ساخت مدل معادلات پیش‌بینی را نشان می‌دهد.

محدوده‌ها و آمارهای پارامترهای درگیر در فرایند مدل‌سازی در جدول (۲) نشان داده‌شده‌است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، دامنه‌های متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، به‌ویژه برای بزرگی و فاصله نسبتاً گسترده هستند. گسترده بودن محدوده‌ها این امکان را می‌دهد تا بتوان در مسائل مختلف و با اطمینان بیشتری از معادلات پیش‌بینی به‌دست‌آمده استفاده نمود؛ لذا این گستردگی نقش مهمی در آنالیز خطر لرزه‌ای دارد.

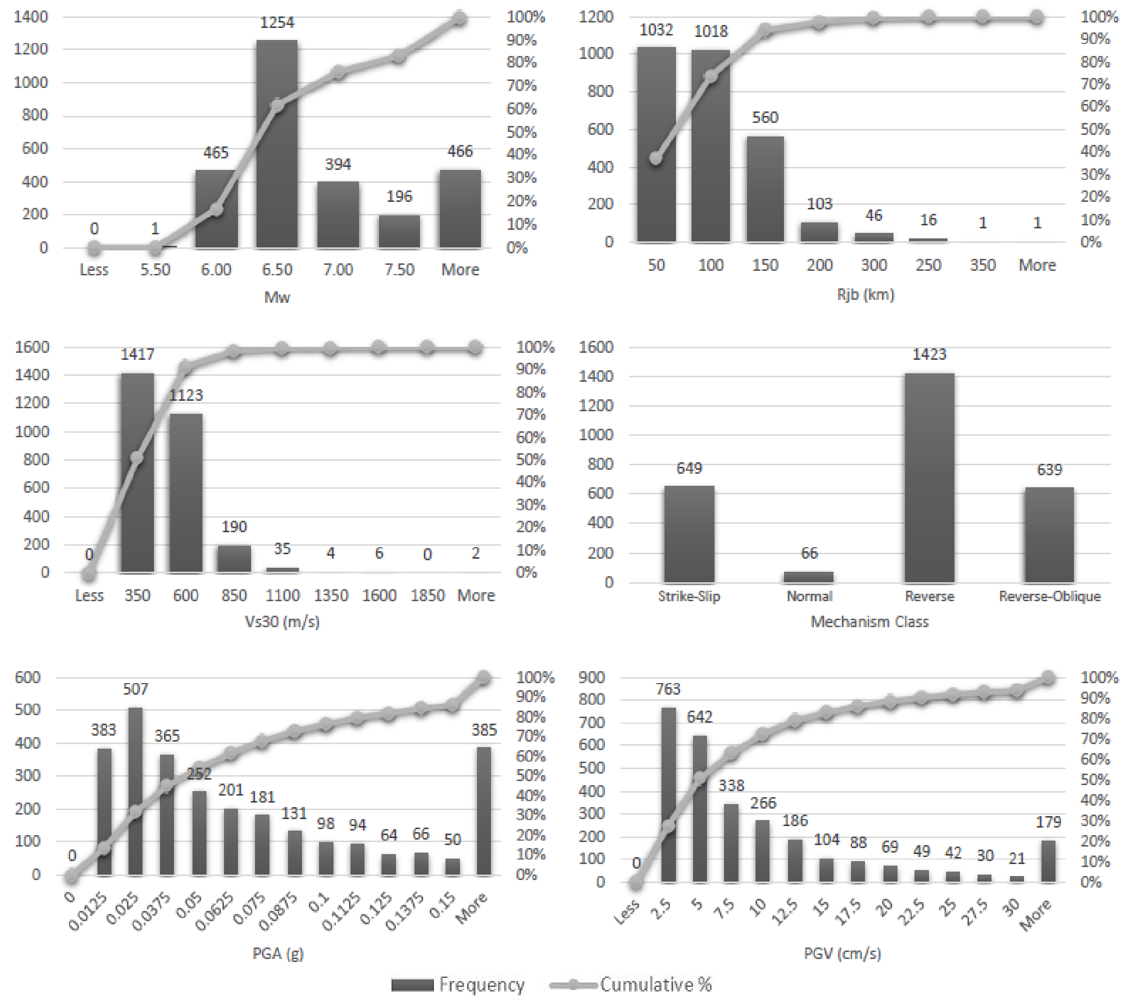
برای تجسم بهتر، داده‌ها به‌وسیلهٔ نمودارهای هیستوگرام نشان داده‌شده‌اند.



شکل ۳ توزیع داده‌های مورداستفاده برای توسعهٔ معادلات پیش‌بینی تفکیک‌شده برپایهٔ نوع گسل

جدول ۲ آمار توصیفی از متغیرهای مورداستفاده برای ساخت مدل

Parameter	M_w	R_{jb} (km)	V_{s30} (m/s)	PGA (g)	PGV (cm/sec)
Mean	6.55	73.34	386.07	0.08	9.38
Standard Error	0.01	0.96	3.28	0.00	0.24
Median	6.30	63.49	345.42	0.04	4.89
Standard deviation	0.59	50.55	172.79	0.11	12.65
Variance	0.35	2555.97	29861.63	0.01	160.14
Kurtosis	-0.68	3.19	10.22	33.92	14.49
Skewness	0.83	1.38	2.12	4.43	3.28
Range	2.70	365.11	1899.78	1.66	117.04
Min.	5.20	0.03	116.35	0.00	0.10
Max.	7.90	365.14	2016.13	1.66	117.14



شکل ٤ هیستوگرام پارامترهای مورداستفاده در مدل‌سازی

پیش‌پردازش داده‌ها

خروجی الگوریتم M5 به‌صورت جمع و تفریق پارامترهای ضریب‌دار و به‌شکل زیر است:

$$\begin{matrix} PGA \\ PGV \end{matrix} = \alpha * M_w + \beta * R_{jb} + \gamma * V_{s30} + C \qquad (۳)$$

که در آن α، β و γ ضرایب پارامترها و C مقدار ثابت است.

در این پژوهش برای آسان‌تر شدن فهم معادله و این‌که تغییر هر پارامتر چه تأثیری در مقدار نهایی PGA و PGV دارد، نخست از همه پارامترهای ورودی و خروجی ln گرفته می‌شود و سپس مدل‌سازی انجام می‌گیرد؛ درنهایت ln از هر دو سوی رابطه حذف می‌گردد. مراحل مذکور به‌ترتیب در روابط (٤)، (٥) و (٦) نمایش داده شده‌است.

$$\begin{matrix} \ln PGA \\ \ln PGV \end{matrix} = \alpha * \ln\ M_w + \beta * \ln R_{jb} + \gamma * \ln V_{s30} + C \qquad (٤)$$

$$\exp\begin{pmatrix} \ln PGA \\ \ln PGV \end{pmatrix} = \exp(\alpha * \ln\ M_w) + \beta * \ln R_{jb} + \gamma * \ln V_{s30} + C\ ) \qquad (٥)$$

$$\frac{PGA}{PGV} = M_w{}^{\alpha} * R_{jb}{}^{\beta} * V_{s30}{}^{\gamma} * \exp C \qquad (٦)$$

پس از محاسبۀ ln همۀ پارامترهای موردنظر ورودی و خروجی ۲۷۷۷ دادۀ گزینش‌شده در نخستین گام از پیش‌پردازش، داده‌ها برپایۀ نوع گسل از یکدیگر تفکیک گردید. برای آنالیز، در هر یک از مجموعه داده‌های تفکیک‌شده برحسب نوع گسل، ۸۰ درصد داده‌ها به‌طور تصادفی به زیرمجموعۀ آموزشی و ۲۰ درصد داده‌ها به زیرمجموعۀ آزمایشی اختصاص یافت که در جدول (۳) شمار داده‌های اختصاص‌یافته برای هر یک از این زیرمجموعه‌ها نشان داده شده‌است. داده‌های یادگیری برای آموزش الگوریتم آماده شد و به‌وسیلۀ آنها مدل ساخته شد. داده‌های اعتبارسنجی در مدل به‌دست‌آمده بااستفاده از داده‌های آموزشی قرار گرفت و از آن برای مشخص کردن توانایی تعمیم مدل‌ها استفاده شد؛ به‌این‌ترتیب، هم داده‌های یادگیری و هم داده‌های اعتبارسنجی در فرایند مدل‌سازی، لحاظ شدند. برای ارزیابی کارکرد مدل‌های به‌دست‌آمده به‌وسیلۀ M5، داده‌های آزمون که هیچ نقشی در ساخت مدل‌ها نداشتند، در مدل نهایی قرار گرفتند و مقادیر خطا و ضریب همبستگی که درادامه توضیح داده شده‌است به‌دست آمد. به‌منظور به‌دست آوردن یک دسته‌بندی مناسب از داده‌ها، چندین ترکیب از مجموعه‌های آموزشی و آزمون مدنظر قرار گرفت. گزینش به‌گونه‌ای بود که بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف استاندارد پارامترها، در مجموعه داده‌های آموزشی و آزمون سازگار باشد.

جدول ۳ تعداد داده‌های آموزشی و آزمایشی در هر یک از انواع گسل

MECHANISM CLASS	TOTAL	TRAIN	TEST
STRIKE - SLIP	649	519	130
NORMAL	66	53	13
REVERSE	1423	1139	284
REVERSE - OBLIQUE	639	511	128

اعتبارسنجی

برپایۀ مرور ادبیات فنی موضوع، سه پارامتر عمده که در اکثر مطالعات به‌عنوان پارامترهای اعتبار سنجی مدل‌ها از آنها استفاده شده‌است، عبارتند از: ضریب همبستگی (Correlation Coefficient)، میانگین ریشۀ مربعات خطا (Root Mean Square Error) و میانگین خطای مطلق (Mean Absolute Error) که به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i-\bar{h}_i)(t_i-\bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(h_i-\bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^{n}(t_i-\bar{t}_i)^2}} \qquad (٦)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i-t_i)^2}{n}} \qquad (٧)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|h_i - t_i| \qquad (٨)$$

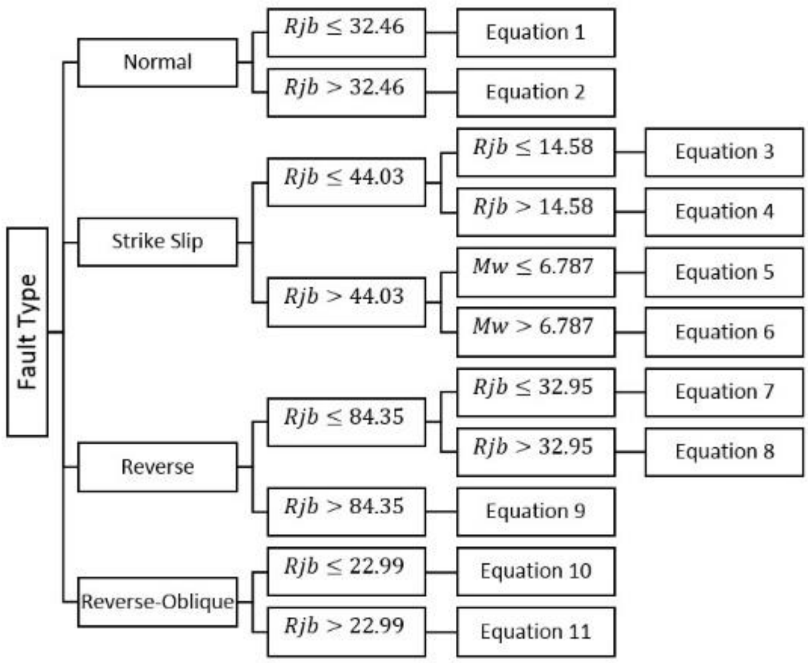
که در آنها h_i و t_i به‌ترتیب، مقادیر خروجی واقعی و پیش‌بینی‌شده برای خروجی iام و $\bar{h}_i$ و $\bar{t}_i$ به‌ترتیب، میانگین مقادیر خروجی واقعی و میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده در نمونه‌ها و n تعداد نمونه‌ها است.

مقادیر بالاتر CC و مقادیر پایین‌تر RMSE و MAE نشان‌دهندۀ یک مدل دقیق‌تر است.

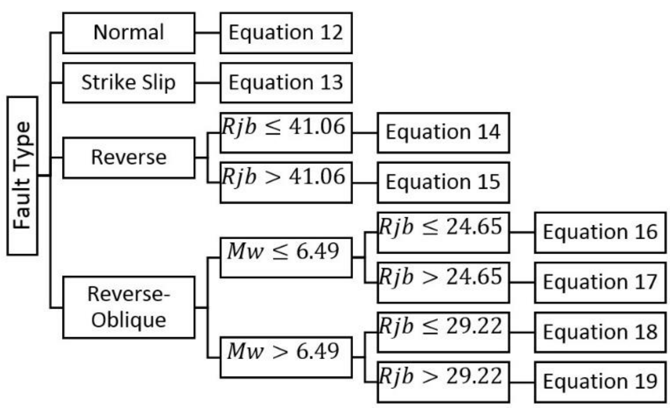
ارائه و تحلیل مدل

در این بخش مدل‌های به‌دست‌آمده به‌روش الگوریتم درختی M5 برای بیشینه شتاب زمین و بیشینه سرعت زمین که برحسب نوع گسل تفکیک‌شده، به‌همراه نمودار درختی پیش‌بینی آمده‌است. سپس نمودار مقادیر اندازه‌گیری‌شده دربرابر مقادیر به‌دست‌آمده به‌وسیلۀ مدل برای مجموعه داده‌های آزمایشی و مجموعه داده‌های اعتبارسنجی رسم شده و با چند مدل دیگر که دارای اشتراک در پارامترهای ورودی مدل هستند مقایسه گردیده‌است. سپس برای هر بخش تحلیل حساسیت و مطالعۀ پارامتری انجام شده‌است.

برای آسانی به‌کارگیری، روابط پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) در قالب نمودار درختی به‌ترتیب در شکل‌های (٥) و (٦) نشان داده شده‌است و درادامه رابطه‌های ارائه‌شده به‌صورت جدول (٤) شامل توان‌های پارامترهای ورودی و ضرایب ثابت هر معادله آمده‌است.



شکل ٥ چارت روابط پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین PGA



شکل ٦ چارت روابط پیش‌بینی بیشینه سرعت زمین PGV

جدول ٤ توان‌های پارامترهای ورودی و ضرایب ثابت معادلات پیش‌بینی حرکات نیرومند زمین

GMPE	Equation	M_w Power	R_{jb} Power	V_{s30} Power	C
PGA	1	2.752	-0.726	-0.564	1.757E-01
	2	3.138	-1.295	-0.091	3.272E-02
	3	0.444	-0.146	-0.031	1.653E-01
	4	0.444	-0.127	-0.031	7.608E-02
	5	0.708	-0.816	-0.457	2.444E+00
	6	0.840	-1.052	-0.052	1.666E+00
	7	3.893	-0.553	-0.025	6.69E-04
	8	6.602	-0.584	-0.331	2.1E-05
	9	3.834	-1.410	-0.327	1.022E-01
	10	0.529	-0.252	-0.023	1.461E-01
	11	1.079	-0.795	-0.304	1.194E+00
PGV	12	4.686	-0.956	-0.321	1.441E-01
	13	7.114	-0.689	-0.784	1.191E-02
	14	6.892	-0.425	-0.042	1.43E-04
	15	8.358	-0.840	-0.792	2.475E-03
	16	0.572	-0.305	-0.780	7.16E+02
	17	0.572	-0.760	-0.528	5.145E+02
	18	4.210	-0.241	-0.114	2.62E-02
	19	0.198	-0.472	-0.617	2.045E+03

مقایسه با مدل‌های دیگر

برای اعتبارسنجی، مدل‌های ارائه‌شده برای بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) برپایهٔ ضریب همبستگی (CC)، میانگین ریشهٔ مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) با ۳ مدل ارائه شده به‌وسیلهٔ Boore and Atkinson [8]، Campbell and Bozorgnia [9] و Gandomi, et al. [10] که دارای اشتراک در پارامترهای استفاده‌شده در مدل‌سازی بودند، مقایسه شد. از برتری‌های مدل ارائه‌شده در این پژوهش می‌توان به محاسبهٔ مستقیم PGA و PGV به‌جای ln این مقادیر، سادگی مدل و برتری از نظر ضریب همبستگی (CC) در بیشتر موارد، میانگین ریشهٔ مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) در انواع گسل؛ هم در مجموعه داده‌های آموزشی و هم در مجموعه داده‌های آزمایشی اشاره نمود. مقایسه برروی داده‌های آموزشی و آزمایشی استفاده‌شده در فرایند ابداع مدل های حاضر انجام‌شده‌است. همان‌طور که درادامه خواهد آمد، ملاحظه می‌شود که در قریب‌به‌اتفاق موارد، برتری با مدل به‌دست‌آمده با روش M5 است. هم‌چنین، اگر یک مدل CC>0.8 ارائه دهد و مقادیر خطا (به‌عنوان‌مثال، RMSE و MAE) حداقل باشند، یک همبستگی قوی میان مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده وجود دارد [19]؛ بنابراین مدل می‌تواند به‌عنوان بسیار خوب درنظر گرفته شود. مدل های M5 به‌دست‌آمده با CC بالا و مقادیر RMSE و MAE کم، به‌میزان قابل‌ملاحظه‌ای قادر

به پیش‌بینی مقادیر هدف هستند[20].

مدل به‌دست‌آمده برای بیشینه شتاب زمین و بیشینه سرعت زمین با ۳ مدل دیگر مطابق جدول (۵) و جدول (٦) مقایسه شد. مشاهده می‌شود که در اکثر موارد برتری با مدل M5 است.

جدول ۵ مقایسۀ مدل M5 با ۳ مدل دیگر PGA برای داده‌های آزمایشی در هر یک از انواع گسل

Mechanism Class	Model Error	Campbell-Bozorgnia - 2007	Boore-Atkinson - 2008	Gandomi-Alavi - 2011	M5
N	CC	0.8988	0.9404	0.8967	0.9373
	MAE	0.5582	0.4320	0.9574	0.0340
	RMSE	0.7450	0.4898	1.0856	0.0567
S	CC	0.8808	0.8505	0.8777	0.9106
	MAE	0.5163	0.6077	0.7430	0.0364
	RMSE	0.6038	0.7473	0.8953	0.0856
R	CC	0.7377	0.7778	0.7205	0.9531
	MAE	0.8121	0.9785	0.5161	0.0313
	RMSE	0.9573	1.1246	0.7055	0.2677
RO	CC	0.6810	0.5142	0.6075	0.8041
	MAE	0.3997	0.7165	0.6532	0.0327
	RMSE	0.5662	0.8016	0.8907	0.0662

جدول ٦ مقایسۀ مدل M5 با ۳ مدل دیگر PGV برای داده‌های آزمایشی در هر یک از انواع گسل

Mechanism Class	Model Error	Campbell-Bozorgnia - 2007	Boore-Atkinson - 2008	Gandomi-Alavi - 2011	M5
N	CC	0.9015	0.9214	0.9491	0.9691
	MAE	0.6154	0.6023	0.5136	4.1675
	RMSE	0.7975	0.7694	0.6624	7.9640
S	CC	0.6651	0.8244	0.7922	0.8939
	MAE	0.5819	0.4762	0.5346	3.0824
	RMSE	0.8906	0.6146	0.6500	5.0869
R	CC	0.7119	0.7815	0.7679	0.8821
	MAE	0.5733	0.5059	0.5405	2.5625
	RMSE	0.7448	0.6690	0.6858	5.7484
RO	CC	0.4689	0.7857	0.7816	0.8560
	MAE	0.6366	0.4932	0.4796	6.7767
	RMSE	1.0323	0.6038	0.5990	9.5758

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت برای درک آن است که هر یک از پارامترهای ورودی ازجمله بزرگی زمین‌لرزه، فاصلهٔ جوینر- بور و متوسط سرعت موج برشی در هر یک از انواع گسل، در ایجاد مدل چه اندازه تأثیرگذارند. به این منظور، به‌صورت جداگانه، برروی هر یک از مدل‌های پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین PGA و بیشینه سرعت زمین PGV تحلیل حساسیت انجام شد. روش انجام تحلیل حساسیت برای هر پارامتر ورودی در یک گسل به این شکل است که از داده‌های آموزشی مورداستفاده در ایجاد مدل، پارامتر ورودی موردنظر حذف شده و سپس با شرایطی دقیقاً همسان که برای ایجاد مدل اصلی استفاده شده‌است، مدل سازی انجام می شود. پس‌ازآن داده‌های آزمایشی برروی مدل جدید پیاده می‌شود و ضریب همبستگی (CC)، میانگین ریشهٔ مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) محاسبه می‌گردد. در جدول (۷) نتایج تحلیل حساسیت بیشینه شتاب زمین در هر یک از انواع گسل برای پارامترهای M_w، V_{s30} و R_{jb} مطابق روشی که گفته شد ارائه شده‌است. مشاهده می‌شود که در همهٔ انواع گسل، پارامتر فاصلهٔ R_{jb} تأثیر زیادی برروی مدل دارد و در نبود این پارامتر ورودی، ضریب همبستگی (CC)، میانگین ریشهٔ مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) دستخوش دگرگونی بسیار زیادی شده‌است. در گسل‌های نرمال و امتدادلغز، پس از پارامتر فاصله R_{jb} که بیشترین تأثیر را در ایجاد مدل دارد، پارامتر M_w به نسبت V_{s30} تأثیر بیشتری در مدل دارد. در گسل‌های معکوس و معکوس مایل، برخلاف گسل‌های نرمال و امتدادلغز، پارامتر V_{s30} به نسبت M_w تأثیر بیشتری در مدل پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین دارد.

تحلیل حساسیت بیشینه سرعت زمین نیز در هر یک از انواع گسل برای پارامترهای M_w، V_{s30} و R_{jb} محاسبه شده‌است. در جدول (۸) دیده می شود که مانند تحلیل حساسیت بیشینه شتاب زمین در همهٔ انواع گسل، پارامتر فاصله R_{jb} تأثیر بسیار زیادی برروی ایجاد مدل پیش‌بینی بیشینه سرعت زمین دارد. پس از پارامتر فاصلهٔ R_{jb}، پارامترهای M_w و V_{s30} به‌ترتیب بیشترین تأثیر را در ایجاد مدل دارند.

جدول ۷ تحلیل حساسیت بیشینه شتاب زمین در هر یک از انواع گسل

Mechanism Class	Model tree in absence of	CC	MAE	RMSE
Normal	-	0.9373	0.0340	0.0567
	Mw	0.8290	0.0372	0.0607
	Rjb	0.0000	0.0571	0.0999
	Vs30	0.8472	0.0296	0.0551
Strike-Slip	-	0.9106	0.0364	0.0856
	Mw	0.8903	0.0429	0.0909
	Rjb	0.1618	0.0702	0.1549
	Vs30	0.9089	0.0406	0.0865
Reverse	-	0.9531	0.0313	0.2677
	Mw	0.9545	0.0438	0.3962
	Rjb	-0.0939	0.0259	0.0301
	Vs30	0.9515	0.0320	0.2602
Reverse - Oblique	-	0.8041	0.0327	0.0662
	Mw	0.8208	0.0320	0.0687
	Rjb	0.3062	0.0480	0.0984
	Vs30	0.8069	0.0314	0.0663

جدول ۸ تحلیل حساسیت بیشینه سرعت زمین در هر یک از انواع گسل

Mechanism Class	Model tree in absence of	CC	MAE	RMSE
Normal	-	0.9691	4.1675	7.9640
	Mw	0.8932	5.2204	9.5378
	Rjb	0.0000	6.6070	13.1714
	Vs30	0.9704	3.9900	7.2333
Strike-Slip	-	0.8939	3.0824	5.0869
	Mw	0.5975	5.2716	9.2373
	Rjb	0.3993	5.7575	10.5690
	Vs30	0.8229	3.7547	6.5424
Reverse	-	0.8821	2.5625	5.7484
	Mw	0.6774	3.2777	8.3848
	Rjb	0.5054	3.7534	9.5527
	Vs30	0.8785	2.7286	5.8157
Reverse - Oblique	-	0.8560	6.7767	9.5758
	Mw	0.6585	11.0747	15.7054
	Rjb	0.3377	11.3965	17.5614
	Vs30	0.8408	7.0653	9.9895

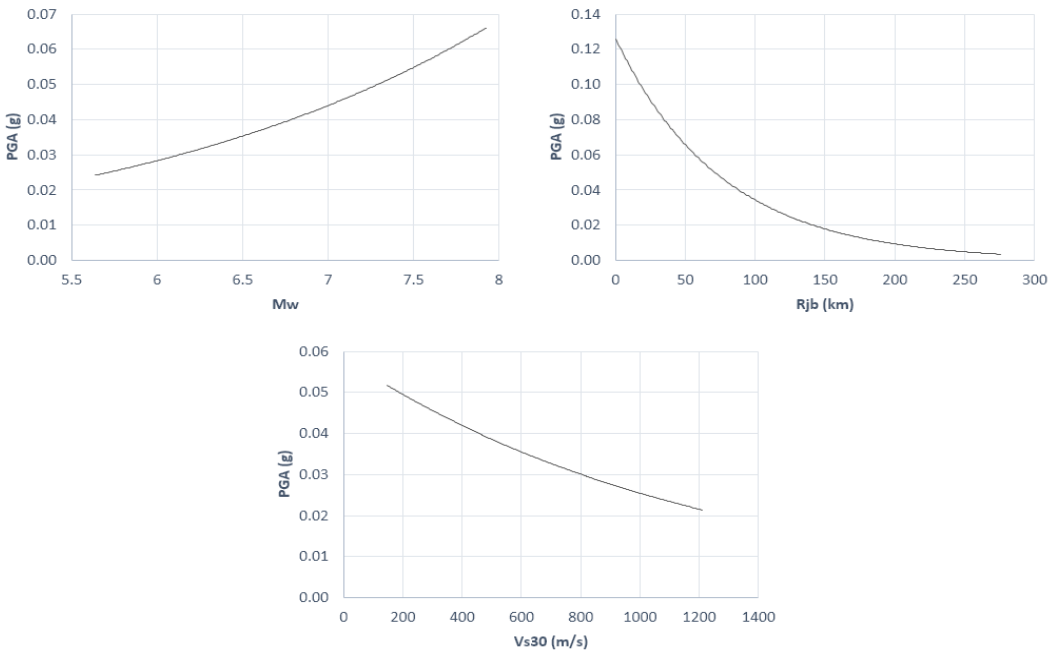
بررسی پارامتریک

در این پژوهش به‌منظور بررسی توانمندی معادلات پیش‌بینی، آنالیز پارامتریک برروی داده‌ها و مدل ارائه‌شده انجام شد. روش کار به این صورت بود که برای هر یک از مدل‌های پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین PGA و بیشینه سرعت زمین PGV تنها یک متغیر پیش‌بینی‌کننده تغییر می‌کند در حالی که دیگر متغیر های ورودی در مقادیر میانگین مجموعه داده های آزمون ثابت نگه داشته می‌شوند. بدین صورت با نهادن این متغیرها در معادلات پیش‌بینی به‌دست‌آمده به‌وسیلهٔ مدل M5 و محاسبهٔ مقادیر بیشینه شتاب زمین PGA و بیشینه سرعت زمین PGV می توان نمودارهای برازش این مقادیر را دربرابر پارامتری که ثابت نبوده‌است، رسم نمود. توانمندی معادلات ارائه‌شده با بررسی این‌که مقادیر پیش‌بینی‌شده چه اندازه با رفتار فیزیکی حاکم بر سیستم موردبررسی هم‌خوانی دارد تعیین شده‌است [21]. شکل (۷) روند پیش‌بینی‌های مدل PGA را با تغییرات پارامترهای M_w، R_{jb} و V_{s30} نشان می‌دهند. نتایج آنالیز پارامتریک نشان می‌دهد که PGA همواره با افزایش M_w افزایش می‌یابد و با افزایش R_{jb} و V_{s30} کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد نتایج آنالیز پارامتریک از دید زمین‌لرزه‌شناسی همگی مورد انتظار بوده‌اند [3-5, 22].

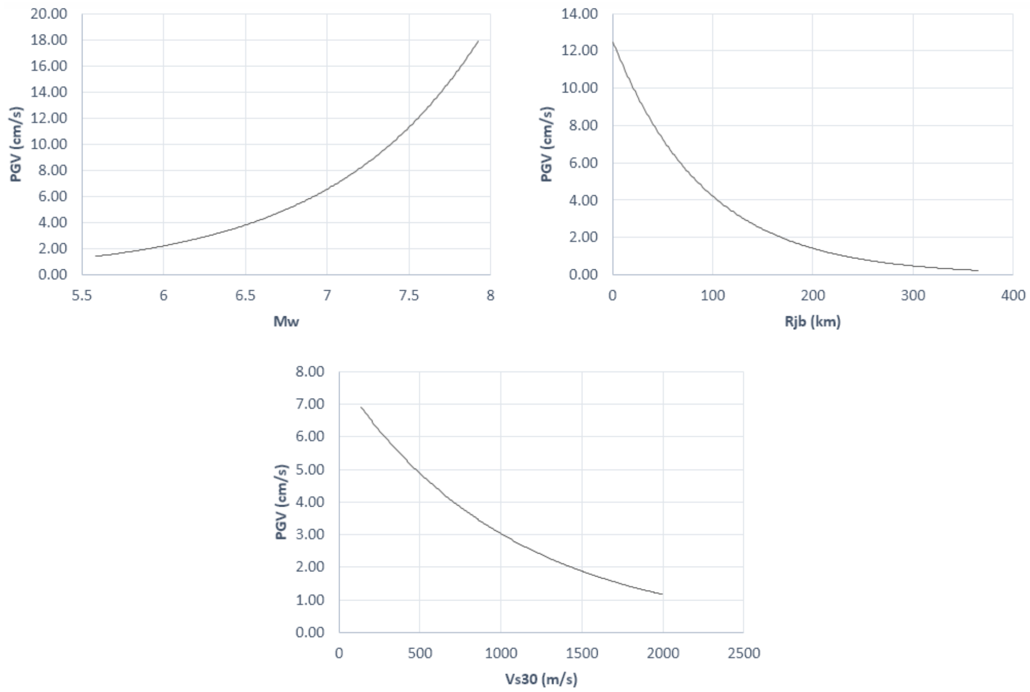
نتایج تأیید می‌کند که معادلات پیشنهادی برای بیشینه شتاب زمین PGA توانمند هستند و می‌توانند با اطمینان به‌منظور پیش‌گویی در مطالعات خطر لرزه‌ای مورداستفاده قرار گیرند.

شکل (۸) گرایش مدل پیش‌بینی PGV را به تغییرات پارامترهای لرزه‌ای، Mw، Rjb و Vs30 نشان می‌دهند. نتایج آنالیز پارامتریک نشان می‌دهد که PGV همواره با افزایش Mw افزایش می‌یابد و با افزایش Rjb و Vs30 کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد نتایج آنالیز پارامتریک با دیدگاه‌های زمین‌لرزه‌شناسی سازگار است

و تائید می‌کند که معادلات پیشنهادی برای بیشینه سرعت زمین PGV قوی هستند و می‌توانند با اطمینان به منظور پیش گویی در مطالعات خطر لرزه‌ای مورداستفاده قرار گیرند.



شکل ۷ آنالیز پارامتریک برای بیشینه شتاب زمین برپایهٔ مدل M5



شکل ۸ آنالیز پارامتریک برای بیشینه سرعت زمین برپایهٔ مدل M5

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با عنایت به اهمیت تحلیل خطر زمین‌لرزه و به‌منظور پیش‌بینی پارامتر های حرکات نیرومند زمین ازجمله بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل مطالعات ارزیابی خطر زمین‌لرزه، از یک روش داده‌کاوی مبتنی بر رگرسیون درختی موسوم به M5 بهره برده شد. GMPEs پیشنهادی براساس گزینش ۲۷۷۷ نگاشت زمین‌لرزه از پایگاه داده‌های گسترده‌ای شامل ۳۵۵۱ نگاشت زمین‌لرزه از سراسر جهان، جمع‌آوری‌شده در پروژهٔ PEER-NGA ساخته شد. پارامترهای ورودی M_W بزرگی زمین‌لرزه، R_{jb} نزدیک‌ترین فاصلهٔ افقی تا تصویر عمودی صفحهٔ گسیختگی گسل (فاصلهٔ جوینر-بور)، V_{s30} متوسط سرعت موج‌برشی در ۳۰ متر بالایی سایت و F مکانیسم گسلش به‌عنوان پارامترهایی کارامد برپایهٔ ادبیات فنی موضوع در تهیهٔ مدل‌های پیش‌بینی حرکات نیرومند زمین به کار گرفته شد. برای تهیهٔ مدل‌های GMPEs، داده‌های انتخابی براساس انواع گسل شامل گسل نرمال، گسل امتدادلغز، معکوس و معکوس مایل که برپایهٔ زاویهٔ ریک تعیین می‌شود جدا گردید و داده‌های هر یک از انواع گسل به زیرمجموعه‌های ۲۰ و ۸۰ درصدی آموزشی و اعتبارسنجی تقسیم گردید و مدل با به‌کارگیری زیرمجموعه داده‌های آموزشی برای هر گسل ایجاد شد. GMPEs پیشنهادی در این پژوهش برآوردهای قابل اعتمادی از مقادیر PGA و PGV ارائه می‌دهند و شرایط و معیارهای مختلفِ مد نظر برای اعتبار سنجی را ارضا می‌کنند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. معادلات پیشنهادی به‌طور چشم‌گیری ساده و جایگزین‌های کارامدی برای معادلات بسیار پیچیدهٔ ارائه‌شده توسط دیگر محققان هستند.

۲. نتایج آنالیز پارامتریک انجام‌شده برروی زیرمجموعهٔ داده های آزمون با رفتار های موردانتظار از دید زمین‌لرزه‌شناسی هم‌خوانی دارند؛ به‌این‌ترتیب که PGA و PGV همواره با افزایش Mw افزایش و با افزایش Rjb و Vs30 کاهش می‌یابند.

۳. نتایج تحلیل‌های حساسیت و پارامتریک به‌روشنی نشان می‌دهند که GMPEs استنتاج‌شده به‌نحو کارامدی رفتار فیزیکی اساسی حاکم بر سیستم را درنظر می‌گیرند و تنها ترکیباتی از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده نیستند که به صورت تصادفی بهترین تناسب را با نتایج تجربی داشته باشند.

٤. مدل های مربوط به PGA و PGV درمقایسه با چند مدل شناخته شده در ادبیات فنی موضوع که از لحاظ پارامترهای ورودی با مدل‌های پیشنهادی این پژوهش اشتراک داشتند، ازنظر ضریب همبستگی (CC)، میانگین ریشهٔ مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) در بیشتر موارد برتر هستند.

۵. نظر به این که GMPEs مبتنی بر M5 برروی یک پایگاه داده‌های جامع با طیف گسترده‌ای از خواص توسعه یافته‌اند، می‌توانند با اطمینان برای اهداف طراحی به‌طور کاربردی مورد بهره‌برداری قرار گیرند.

٦. افزون بر سادگی روابط، برخلاف اکثر مدل های پیش‌بینی حرکات نیرومند زمین محاسبهٔ بیشینه شتاب زمین(PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) بدون استفاده از لگاریتم به‌عنوان یکی از برتری‌های مدل پیش‌بینی ارائه‌شده در این پژوهش است.

مراجع

1. N., Luco and C. A., Cornell, "Structure-specific Scalar Intensity Measures for Near-source and Ordinary Earthquake Ground Motions", Earthquake Spectra, Vol. 23, Pp. 357-392, (2007).
2. H., Güllü and E., Erçelebi, "A Neural Network Approach for AttenuationRelationships: An Application

Using Strong Ground Motion Data from Turkey", Engineering Geology, Vol. 93, Pp. 65-81, (2007).

3. G. M., Atkinson and D. M., Boore, Boore-Atkinson NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters: Pacific Earthquake Engineering Research Center, (2007).
4. D. M., Boore, W. B., Joyner, and T. E., Fumal, "Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes :A Summary of Recent Work", Seismological research letters, Vol. 68, Pp. 128-153, (1997).
5. K. W., Campbell and Y., Bozorgnia, Campbell-Bozorgnia NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters: Pacific Earthquake Engineering Research Center, (2007).
6. A. F., Cabalar and A., Cevik, "Genetic Programming-based Attenuation Relationship: An Application of Recent Earthquakes in Turkey", Computers & Geosciences, Vol. 35, Pp. 1884-1896, (2009).
7. P., Somerville and R., Graves, "Characterization of Earthquake Strong Ground Motion", in Landslide Tsunamis: Recent Findings and Research Directions, ed: Springer, Pp. 1811-1828, (2003).
8. D. M., Boore and G. M., Atkinson, "Ground-motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s", Earthquake Spectra, Vol. 24, Pp. 99-138, (2008).
9. K. W., Campbell and Y., Bozorgnia, "NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s", Earthquake Spectra, Vol. 24, Pp. 139-171, (2008).
10. A. H., Gandomi, A. H., Alavi, M., Mousavi, and S. M., Tabatabaei, "A Hybrid Computational Approach to Derive New Ground-motion Prediction Equations", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 24, Pp. 717-732, (2011).
11. S., Thomas, G., Pillai, K., Pal, and M., Zuhair, "Prediction of Peak Ground Acceleration (PGA) using Artificial Neural Networks", Networks, Vol. 8, P. 10, (2013).
12. F., Yerlikaya-Özkurt, A., Askan, and G. W., Weber, "An Alternative Approach to the Ground Motion Prediction Problem by a Non-parametric Adaptive Regression Method", Engineering Optimization, Vol. 46, Pp. 1651-1668, (2014).
13. A. H., Alavi and A. H., Gandomi, "Prediction of Principal Ground-motion Parameters Using a Hybrid Method Coupling Artificial Neural Networks and Simulated Annealing", *Computers & Structures*, Vol. 89, Pp. 2176-2194, (2011).
14. J. R., Quinlan, "Learning with Continuous Classes", in 5th Australian joint conference on artificial intelligence, Pp. 343-348, (1992).
15. I., Witten and Y., Wang, "Induction of Model Trees for Predicting Continuous Classes", in Proc. Poster

Papers Europ. *Conf. Machine Learning,* (1997).

16. A., Kaveh, T., Bakhshpoori and S., Hamze-Ziabari, "Derivation of New Equations for Prediction of Principal Ground-motion parameters using M5′ algorithm," *Journal of Earthquake Engineering*, Pp. 1-21, (2016).
17. N. C., Jung, I., Popescu, P., Kelderman, D. P., Solomatine, and R. K., Price, "Application of Model Trees and other Machine Learning Techniques for Algal Growth Prediction in Yongdam Reservoir, Republic of Korea", *Journal of Hydroinformatics,* Vol. 12, Pp. 262-274, (2010).
18. M., Power, B., Chiou, N., Abrahamson, and C., Roblee, "The Next Generation of Ground Motion Attenuation Models (NGA) Project: An Overview", in Proceedings, *Eighth National Conference on Earthquake Engineering,* (2006).
19. G. N., Smith, Probability and statistics in civil engineering: Collins London, (1986).
20. Y., Pan, J., Jiang, R., Wang, H., Cao, and Y., Cui, "A Novel QSPR Model for Prediction of Lower Flammability Limits of Organic Compounds Based on Support Vector Machine", *Journal of hazardous materials*, Vol. 168, Pp. 962-969, (2009).
21. Y., Kuo, M., Jaksa, A., Lyamin, and W., Kaggwa, "ANN-based Model for Predicting the Bearing Capacity of Strip Footing on Multi-layered Cohesive Soil", *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, Pp. 503-516, (2009).
22. N. N., Ambraseys, K. U., Simpson, and J. J.U Bommer, "Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 25, Pp. 371-400, (1996).